МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

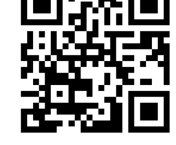




УДК 621.793.182
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-83-90

Оригинальное теоретическое исследование

Аналитическое моделирование теплового источника при наплавке стальной втулки центробежным методом с использованием осесимметричной электрической дуги



EDN: PZSKEU

С.П. Глушко
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
✉ sputnik_s7@mail.ru

Аннотация

Введение. Технология центробежной биметаллизации с применением независимой осесимметричной электрической дуги становится всё более значимой ввиду высокой потребности в улучшении качества биметаллических композиций, используемых в производстве подшипников скольжения, гильз для цилиндров гидромашин и элементов пар трения в двигателях внутреннего сгорания. Имеющиеся исследования в этой области подчеркивают необходимость более глубокого изучения особенностей тепловых процессов, связанных с этой технологией. В современной научной литературе недостаточно полно раскрыты вопросы, касающиеся контроля температуры на границе раздела материалов, и имеющийся пробел в представлении о поведении биметаллических соединений в условиях нагрева тормозит внедрение этой технологии в промышленное производство. Цель данного исследования — проведение аналитического моделирования теплового источника в виде осесимметричной электрической дуги для определения коэффициента сосредоточенности тепла и снижения доли экспериментальных данных в модели теплового процесса, что позволит повысить ее универсальность. Задачи, вытекающие из поставленной цели, заключаются в сравнении результатов расчета эффективной плотности теплового потока по двум различным выражениям (с использованием тригонометрической и экспоненциальной функций), а также в оценке распределения теплового потока осесимметричной дуги по внутренней поверхности втулок (это необходимо для установления зависимости между температурой наружной поверхности наплавляемой втулки и температурой на границе раздела материалов).

Материалы и методы. Прямой контроль температуры на границе раздела материала основы и наплавляемого слоя является затруднительным, однако возможно осуществить косвенный контроль с помощью температуры наружной поверхности. Для определения зависимости между температурой наружной поверхности наплавляемой втулки (заготовки) и температурой на её внутренней поверхности, то есть на границе раздела материала основы и наплавляемого слоя, были проведены моделирование теплового источника и оценка распределения теплового потока осесимметричной электрической дуги по внутренней поверхности втулки.

Результаты исследования. В ходе работы получено аналитическое выражение для определения коэффициента сосредоточенности тепла, $k = 0{,}945 / R_1^2$, который необходим для расчёта параметров электрической дуги с учётом распределения эффективной тепловой мощности в пятне нагрева по экспоненциальной зависимости. Для моделирования теплового источника процесса наплавки (биметаллизации) внутренней поверхности стальных втулок с нагревом независимой осесимметричной электрической дугой были сравнены результаты расчета эффективной плотности теплового потока по двум выражениям: $q = q_0 \cdot cos^3\varphi$ и $q = q_0 \cdot e^{-k \cdot r_n^2}$. Это сравнение показало, что для расчетов температурных полей при наплавке внутренней поверхности стальных втулок (заготовок) металлическими сплавами с нагревом независимой осесимметричной дугой можно использовать аналитическую экспоненциальную форму представления теплового источника.

Обсуждение и заключение. Моделирование тепловых процессов центробежной биметаллизации с применением упрощенных схем равномерного распределения теплового потока $q = const$ на всей свободной поверхности наплавляемого слоя, что имитирует распространение тепла электрической дуги, требует введения корректирующих коэффициентов и проведения серии экспериментов для их определения. В этом случае в описании теплового процесса

в модели тепловых процессов высока доля экспериментальных данных и корректирующих коэффициентов. Поэтому для исключения большей части экспериментальных составляющих при моделировании теплового источника и распределения теплового потока процесса наплавки (биметаллизации) внутренней поверхности стальных втулок с нагревом независимой осесимметричной электрической дугой автором в данной работе предложено аналитическое решение для расчета эффективной плотности теплового потока в виде экспоненциальной функции, которая позволяет определить коэффициент сосредоточенности тепла независимой осесимметричной электрической дуги в процессе наплавки, который необходим для повышения точности расчета температурного поля биметаллизируемой втулки и улучшения контроля температуры тепловых параметров технологического процесса.

Ключевые слова: биметаллы**,** наплавка, электрическая дуга, центробежная биметаллизация, детали машин, износостойкое покрытие, антифрикционное покрытие, восстановление деталей, тепловой источник, расчет температуры, коэффициент сосредоточенности тепла, моделирование электрической дуги

Благодарности. Автор выражает благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.

Для цитирования. Глушко С.П. Аналитическое моделирование теплового источника при наплавке стальной втулки центробежным методом с использованием осесимметричной электрической дуги. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):83–90. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-83-90

Original Theoretical Research

Analytical Modeling of a Heat Source under Welding of a Steel Sleeve by the Centrifugal Method Using an Axisymmetric Electric Arc

Sergey P. Glushko
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
✉ sputnik_s7@mail.ru

Abstract

Introduction. The technology of centrifugal bimetallization using an independent axisymmetric electric arc is becoming increasingly important due to the high need to improve the quality of bimetallic compositions used in the manufacture of plain bearings, cylinder barrels for hydraulic units, and friction pair elements in internal combustion engines. The existing research in this area emphasizes the need for a more in-depth study of the features of thermal processes associated with this technology. In modern scientific literature, issues related to temperature control at the interface of materials are not fully disclosed, and the existing gap in the concept of the behavior of bimetallic compounds under heating conditions hinders the implementation of this technology in industrial production. The objective of this study is to conduct analytical modeling of a heat source in the form of an axisymmetric electric arc to determine the heat concentration coefficient and reduce the proportion of experimental data in the thermal process model, which will increase its versatility. The tasks arising from the stated goal are comparison of the results of calculating the effective heat flux density from two different expressions (using trigonometric and exponential functions), as well as evaluation of the distribution of the heat flux of an axisymmetric arc along the inner surface of the sleeves (this is required to establish the relationship between the temperature of the outer surface of the welded sleeve and the temperature at the interface between the materials).

Materials and Methods. Direct control of the temperature at the interface between the base material and the deposited layer is difficult, but it is possible to carry out indirect control using the temperature of the outer surface. To determine the relationship between the temperature of the outer surface of the deposited sleeve (billet) and the temperature on its inner surface, i.e., at the interface between the base material and the deposited layer, a heat source was modeled, the heat flux distribution of an axisymmetric electric arc along the inner surface of the sleeve was estimated, and an analytical expression was obtained to determine the heat concentration coefficient.

Results. In the course of the work, an analytical expression was obtained for determining the coefficient of heat concentration, $k = 0.945 / R_1^2$. It was required for calculating the electric arc parameters considering the distribution of the effective thermal power in the hot spot according to an exponential dependence. To simulate the heat source of the facing process (bimetallization) of the inner surface of steel sleeves with heating by an independent axisymmetric electric arc, the results of calculating the effective heat flux density were compared using two expressions: $q = q_0 \cdot cos^3\varphi$ and $q = q_0 \cdot e^{-k \cdot r_n^2}$. This comparison showed that for calculating temperature fields during facing of the inner surface of steel sleeves (billets) with metal alloys under heating by an independent axisymmetric arc, it was possible to use the analytical exponential form of representation of the heat source.

Discussion and Conclusion. Modeling thermal processes of the centrifugal bimetallization using simplified schemes of uniform distribution of heat flow $q = const$ on the entire free surface of the deposited layer, which simulates the spread of heat of an electric arc, requires the introduction of correction factors and a series of experiments to determine them.

In this case, the description of the thermal process in the thermal process model contains a high proportion of experimental data and correction factors. Therefore, in order to exclude most of the experimental components when modeling the heat source and heat flow distribution of the facing process (bimetallization) of the inner surface of steel sleeves under heating by an independent axisymmetric electric arc, the author in this paper proposes an analytical solution for calculating the effective heat flow density in the form of an exponential function. This function allows determining the heat concentration coefficient of an independent axisymmetric electric arc during the facing process, which is required to increase the accuracy of calculating the temperature field of the bimetallized sleeve and improve the temperature control of the thermal parameters of the technological process.

Keywords: bimetals, surfacing, electric arc, centrifugal bimetallization, machine parts, wear-resistant coating, antifriction coating, restoration of parts, heat source, temperature calculation, heat concentration coefficient, electric arc modeling

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board of the Journal and the reviewers for their professional analysis and assistance in correcting the article.

For Citation. Glushko SP. Analytical Modeling of a Heat Source under Welding of a Steel Sleeve by the Centrifugal Method Using an Axisymmetric Electric Arc. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2025;25(2):83–90. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-83-90

Введение. В узлах и механизмах различного технологического оборудования используют подшипники скольжения, для изготовления которых применяют дорогостоящие антифрикционные и износостойкие сплавы из различных металлов [1]. Машиностроение также нуждается в деталях пар трения гильз двигателей внутреннего сгорания, передач винт-гайка скольжения [2], гильз для цилиндров гидромашин, работающих в условиях высокого давления в диапазоне 50–60 МПа [3]. Для улучшения эксплуатационных характеристик и снижения расхода дорогостоящих материалов целесообразно изготавливать эти детали из биметалла, в частности, из композиции сталь–бронза. Для получения биметаллических композиций можно использовать, к примеру, лазерное [4] или термическое напыление [5]. Но при этих технологиях напыления весьма затруднительно получать слои толщиной в 2–4 мм с припуском для черновой и чистовой обработки. Для наплавки слоев с достаточной для последующей обработки толщиной можно использовать порошковую наплавку по аддитивной технологии с применением энергии электронного или лазерного луча [6], для получения покрытий из износостойких сплавов возможно использование лазерной наплавки [7]. При производстве металлических композитов с металлической матрицей применяют лазерные аддитивные технологии [8]. Кроме того, используют селективную лазерную плавку (SLM) и электронно-лучевую плавку (EBM) — это новые технологии быстрого аддитивного производства [9], которые позволяют изготавливать сложные монолиты из металлов или сплавов путём направленной по CAD-модели селективной плавки порошковых слоёв. Но при наплавке внутренних поверхностей втулок с диаметрами 80–250 мм разместить внутри них узлы источников энергии или затруднительно, или невозможно.

Ввиду сложности технической реализации перечисленных технологий становится всё более значимым применение технологии центробежной биметаллизации с использованием независимой осесимметричной электрической дуги. В работе [10] описано моделирование теплового процесса центробежной биметаллизации внутренней поверхности втулок, где для расчета температурного поля биметаллизируемой втулки была принята упрощенная схема равномерного распределения теплового потока $q = const$ на всей свободной поверхности наплавляемого слоя, что имитирует распространение тепла электрической дуги, которая движется от торца к торцу наплавляемой втулки со скоростью v = 0,086 м/с (значение числа Пекле для этого случая допускает такую имитацию). Недостаток этой схемы заключается в том, что при её использовании требуется введение корректирующих коэффициентов и выполнение серии экспериментов для их определения. Модель в этом случае теряет универсальность, и увеличивается доля экспериментальных данных и корректирующих коэффициентов в описании теплового процесса.

Аналитическое моделирование плотности теплового потока электрической дуги, расчёт температуры материала в пятне нагрева дуги и описание температурного поля биметаллизируемой втулки (заготовки) позволят решить стоящую перед автором задачу — уменьшить долю экспериментально полученных данных в модели, повысить точность расчета температурного поля биметаллизируемой втулки и усилить контроль за температурой технологического процесса.

Для оценки распределения теплового потока процесса биметаллизации втулок и исключения большей части экспериментально полученных данных необходимо предпринять следующие действия:

– сравнить результаты расчета эффективной плотности теплового потока с тригонометрической функцией и экспоненциальной функцией;

– выявить возможность представления теплового источника при наплавке внутренних поверхностей стальных втулок по предлагаемой технологии с помощью экспоненциальной формы для определения коэффициента сосредоточенности тепла независимой осесимметричной электрической дуги в процессе наплавки.

Материалы и методы. В данной работе исследована технология центробежной биметаллизации с применением независимой осесимметричной электрической дуги, схема которой представлена на рис. 1.

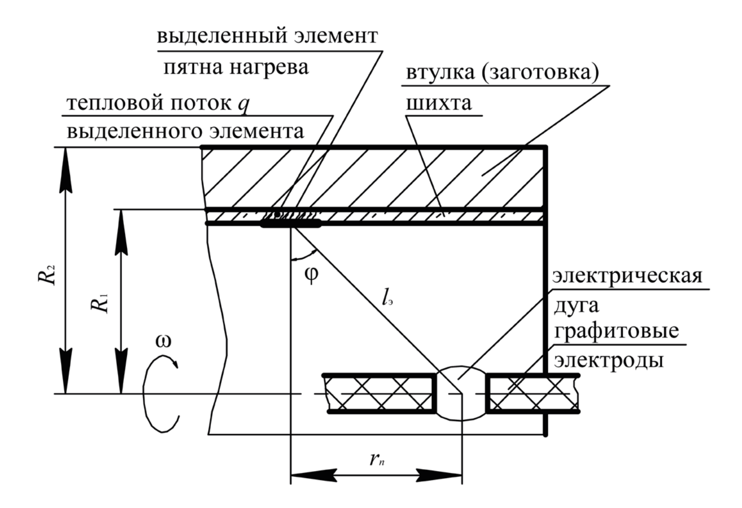


Рис. 1. Схема наплавки внутренней поверхности стальной втулки (заготовки) центробежным способом с нагревом независимой осесимметричной электрической дугой

Производство биметаллических втулок (заготовок) с нагревом независимой электрической дугой обеспечивает высокое качество наплавляемого слоя и биметаллической композиции, если налажен корректный контроль температуры на границе раздела наплавляемого слоя и стальной основы — на внутреннем диаметре втулки R_1. В промышленных условиях прямой контроль температуры в зоне диффузии реализовать затруднительно, но возможен её косвенный контроль по температуре наружной поверхности стальной основы на диаметре R_2 при наличии математической модели, связывающей температуру наружной поверхности наплавляемой заготовки (втулки) на диаметре R_2 и температуру её внутренней поверхности на диаметре R_1 [10]. Для решения этой задачи необходимо использовать теорию теплопереноса [11]. Кроме того, нужны исходные данные, в том числе корректное представление теплового источника [12] при расчете температурных режимов электродуговых процессов [10], к примеру, биметаллизируемых втулок с нагревом независимой осесимметричной электрической дугой.

Математические модели электрической дуги можно разделить на две группы по способу их построения [13]: теоретические модели, получаемые на основе законов физики, и экспериментальные, получаемые в результате аппроксимации опытных данных различными методами [14].

Применение моделей, в которых тепловой источник представлен как равномерно распределенный по длине, не даст точных результатов расчета температурных полей биметаллизируемых втулок, так как не соответствует реальному процессу.

Для получения модели нагрева биметаллизируемой втулки предлагается оценить распределение теплового потока осесимметричной электрической дуги по внутренней поверхности втулки (заготовки) [10], это проще, чем моделирование тепловых процессов для нелинейных несимметричных схем [15].

Представим задачу как линейную и для упрощения модели допустим также, что длина заготовки достаточно велика, чтобы пренебречь потерями тепла у торцов. Действие дуги заменим точечным источником постоянной интенсивности (рис. 1). Тепловая мощность дуги доходит до внутренней поверхности стальной втулки сквозь слой шихты практически без потерь [1].

Для такой схемы эффективная плотность теплового потока на внутренней поверхности стальной втулки на диаметре R_1 равна:

$$q = \frac{0,9P_{д}}{4\pi} \cdot \frac{cos\,\varphi}{l_{э}^2},\ \text{Вт/м}^2, \qquad (1)$$

где $P_{д}$ — электрическая мощность дуги, Вт; $l_{э}$ — расстояние от центра дуги до центра выделенного элемента на внутренней поверхности стальной втулки, м; φ — угол между направлением радиуса-вектора потока и нормалью к облучаемому сквозь слой шихты элементу стальной заготовки, град.

При $\varphi = 0$, $l_{э} = R_1$ плотность теплового потока максимальна:

$$q_0 = \frac{0,9P_{д}}{4\pi R_1^2},\ \text{Вт/м}^2,$$

здесь R_1 — радиус внутренней поверхности стальной втулки, м.

Поскольку

$$l_э = \frac{R_1}{cos\,\varphi},$$

выражение (1) можно представить в виде

$$q = \frac{0,9P_д \cdot cos\,\varphi}{4\pi R_1^2} = q_0 \cdot cos^3\,\varphi. \quad (2)$$

Введем в равенство (2) соотношение q/q_0 = 0,05 и получим φ = 68°23’, что соответствует $\rho = r_n/R$ = 2,52, где r_n — радиус пятна нагрева, т. е. на расстоянии, близком к 2,5–3,0 радиусам заготовки, влияние источника сводится к минимуму.

Распределение плотности теплового потока точечного источника может быть описано экспоненциальной зависимостью:

$$q = q_0 \cdot e^{-k \cdot r_n^2}, \quad (3)$$

где k — коэффициент сосредоточенности тепла, 1/м^2.

Коэффициент сосредоточенности тепла k необходим для расчёта параметров электрической дуги с учётом распределения эффективной тепловой мощности в пятне нагрева. Определение значения коэффициента сосредоточенности тепла нужно для расчёта температуры материала в пятне нагрева дуги, так как характер распределения теплоты оказывает существенное влияние на температурное поле в области пятна нагрева.

Когда ось дуги направлена перпендикулярно к поверхности нагрева, то пятно нагрева получается в виде окружности с удельным нормально распределенным по площади потоком. В этом случае источник называют нормально-круговым.

В расчетных схемах сварки при вертикальном расположении электродов относительно поверхности нагрева значения коэффициентов сосредоточенности тепла находятся в диапазоне от 1,5 до 6,0. Эти схемы, учитывающие распределение тепла источников, очень сложные и на практике используются редко.

Для конкретных случаев значения параметров q_0, q, и k, характеризующие тепловые потоки электрической дуги, чаще всего определяются экспериментально.

Чтобы выяснить предпочтительность применения равенства (2) и (3) для расчета удельного теплового потока (по этим выражениям), нужно получить выражение, по которому можно рассчитывать коэффициент сосредоточенности тепла k. С этой целью следует решить систему уравнений (2) и (3).

С учетом того, что

$$cos\,\varphi = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + r_n^2}},$$

определяем значение коэффициента сосредоточенности тепла:

$$k = \frac{1}{2,52} \cdot \int_0^{2,52} \left(-\frac{3}{r_n^2}\right) \cdot ln\left[\frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + r_n^2}}\right] \cdot dr.$$

Так как $cos\varphi$ можно представить в виде:

$$cos\,\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\rho^2}},$$

то коэффициент сосредоточенности тепла будет равен:

$$k = \frac{1}{5,04R_1^2} \cdot \int_0^{2,52} \frac{ln\left(1+\rho^2\right)}{\rho^2} \cdot dr. \quad (4)$$

Используем замену переменной в виде:

$$g = ln\left(1+\rho^2\right),$$

и интегрируем уравнение (4) по частям

$$k = \frac{3}{5,04R_1^2} \cdot \left[-\frac{ln\left(1+\rho^2\right)}{\rho} + \int \frac{1}{\rho} \cdot \frac{2\rho}{1+\rho^2} d\rho\right]_0^{2,52} = \frac{3}{5,04R_1^2} \cdot \left[2arctg\rho - \frac{ln\left(1+\rho^2\right)}{\rho}\right]_0^{2,52}.$$

При r = 0 выражение $ln(1 + \rho^2) / \rho$ не определено, поэтому используем предельный переход

$$\lim_{\rho \to 0} \frac{ln\left(1+\rho\right)^2}{\rho} = \lim_{\rho \to 0} \frac{ln\left(1+\rho^2\right) \cdot \rho}{\rho^2} = \lim_{\rho \to 0} \frac{ln\left(1+\rho^2\right)}{\rho^2} \cdot \lim_{\rho \to 0} \rho = 1 \cdot 0 = 0,$$

где $\lim_{\rho \to 0} \frac{ln(1+\rho^2)}{\rho^2} = 1$.

Так как $k|_{r_п = 0} = 0$, то коэффициент сосредоточенности тепла будет равен:

$$k = k\Big|_{r_n = R_1} = k\Big|_{r_n = R_1} - k\Big|_{r_n = 0} = \frac{3}{5{,}04 R_1^2} \cdot \left[2 \cdot arctg 2{,}52 - \frac{ln\left(1 + 2{,}52\right)^2}{2{,}52} \right] = \frac{0{,}945}{R_1^2}. \tag{5}$$

Результаты исследования. Используем полученное выражение (5) для расчета плотности теплового потока по уравнению (3), чтобы затем сопоставить результаты вычислений по уравнениям (2) и (3).

Сопоставим значения $Z_1 = cos^3\varphi$ и $Z_2 = e^{-k \cdot r_n^2}$ в равенствах (2) и (3), задав $k = 0{,}945/R_1^2$.

Результаты расчётов представим в виде номограммы (рис. 2).

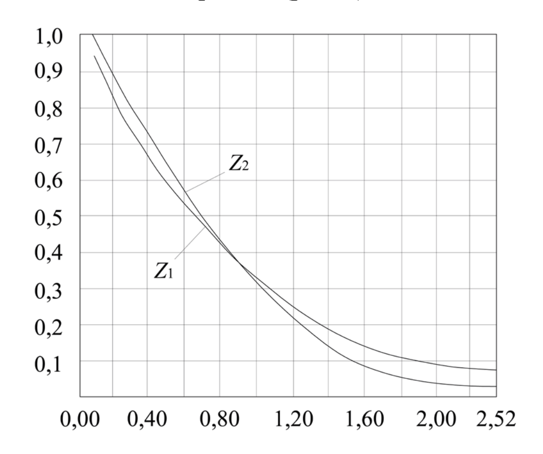


Рис. 2. Номограмма для сопоставления значений $Z_1 = cos^3\varphi$ и $Z_2 = e^{-k \cdot r_n^2}$ в равенствах (2) и (3)

Сравнение расчетных значений величин $Z_1 = cos^3\varphi$ и $Z_2 = e^{-k \cdot r_n^2}$ при ρ = 0 ÷ 2,52 показало, что они отличаются не более чем на 10 %. Это позволяет использовать для расчетов температурных полей при наплавке внутренней поверхности стальных втулок (заготовок) металлическими сплавами с нагревом независимой осесимметричной дугой экспоненциальную форму представления теплового источника.

Обсуждение и заключение. Для расчета температурного поля биметаллизируемой втулки принята упрощенная схема равномерного распределения теплового потока *q = const* на всей свободной поверхности наплавляемого слоя электрической дуги, которая движется возвратно-поступательно со скоростью *v* = 0,086 м/с (значение числа Пекле для этого случая допускает такую имитацию). Недостаток этой модели теплового источника в том, что плотность теплового потока определена из условия равномерного распределения теплоты, то есть требуется применение корректирующих коэффициентов и проведения серии экспериментов для их определения. Таким образом, в описании теплового процесса будет содержаться высокая доля экспериментальных данных и корректирующих коэффициентов. Поэтому для исключения большей части этих данных при моделировании теплового источника и распределения теплового потока процесса наплавки (биметаллизации) в исследуемом методе проведено сравнение результатов расчета эффективной плотности теплового потока по двум выражениям: с тригонометрической функцией и экспоненциальной функцией. Было установлено, что экспоненциальная форма представления теплового источника при наплавке внутренних поверхностей стальных втулок (заготовок) центробежным способом с нагревом независимой осесимметричной электрической дугой может быть использована для определения коэффициента сосредоточенности тепла в процессе наплавки, этот коэффициент применяется для определения плотности теплового потока электрической дуги, температуры в месте нагрева и описания температурного поля биметаллизируемой втулки в аналитическом виде, что повышает точность расчета ее температурного поля и возможности контроля температуры данного технологического процесса.

Список литературы / References

1. Денисенко С.Г., Глушко С.П. Оптимизация технологии производства подшипников скольжения из биметалла сталь-бронза. В: *Тезисы доклада IV Украинской республиканской научно-технической конференции «Современные методы наплавки, упрочняющие покрытия и используемые материалы».* Харьков: Харьковский автомобильно-дорожный институт; 1990. С. 70–71.

Denisenko SG, Glushko SP. Optimization of Production Technology of Plain Bearings from Steel-Bronze Bimetal. In: *Abstracts of the IV Ukrainian Republican Scientific and Technical Conference "Modern Methods of Surfacing, Hardening Coatings and Materials Used".* Kharkov: Kharkov Automobile and Highway Institute; 1990. P. 70–71. (In Russ.)

2. Глушко С.П., Денисенко С.Г. Синтез критерия качества биметаллических подшипников скольжения. В: *Тезисы доклада Всесоюзной научной конференции «Конструкционная прочность, долговечность, упрочнение материалов и деталей машин»*. Волгоград: Дом науки и техники; 1990. С. 202–204.

Glushko SP, Denisenko SG. Synthesis of Quality Criterion for Bimetallic Plain Bearings. In: *Abstracts of the All-Union Scientific Conference "Structural Strength, Durability, Hardening of Materials and Machine Parts"*. Volgograd: Center of Science and Technology; 1990. P. 202–204. (In Russ.)

3. Клеветов Д.В., Старостин Д.А. Подход к увеличению долговечности гидромашин за счет снижения интенсивности износа при технологической обкатке. В: *Труды Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции «Современные проблемы надежности и техносферной безопасности: образование, наука, практика», посвященной 20-летию кафедры безопасности жизнедеятельности, экологии и химии Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева.* Ковров: Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева; 2019. С. 41–46.

Klevetov DV, Starostin DA. An Approach to Increasing the Durability of Hydraulic Machines by Reducing the Intensity of Wear during Technological Running. In: *Proc. All-Russian Sci.-Tech. and Research-Methodological Conference "Modern Problems of Reliability and Technosphere Safety: Education, Science, Practice", dedicated to the 20th Anniversary of the Department of Life Safety, Ecology and Chemistry, Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev*. Kovrov: Degtyarev State Technological Academy; 2019. P. 41–46. (In Russ.)

4. Arias-González F, del Val J, Comesaña R, Penide J, Lusquiños F, Quintero F, et al. Production of Phosphor Bronze Coatings by Laser Cladding. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:177–182. https://doi.10.1016/j.promfg.2017.09.031

5. Kumar RK, Kamaraj M, Seetharamu S, Pramod T, Sampathkumaran P. Effect of Spray Particle Velocity on Cavitation Erosion Resistance Characteristics of HVOF and HVAF Processed 86WC–10Co4Cr Hydro Turbine Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2016;25(6):1217–1230. https://doi.10.1007/s11666-016-0427-3

6. Frazier WE. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(6):1917–1928. https://doi.10.1007/s11665-014-0958-z

7. Zhenglei Yu, Lunxiang Li, Deqiang Zhang, Guangfeng Shi, Guang Yang, Zezhou Xu, et al. Study of Cracking Mechanism and Wear Resistance in Laser Cladding Coating of Ni-Based Alloy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021;34(92):1–14. https://doi.org/10.1186/s10033-021-00599-8

8. Neng Li, Wei Liu, Yan Wang, Zijun Zhao, Taiqi Yan, Guohui Zhang, et al. Laser Additive Manufacturing on Metal Matrix Composites: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* 2021;34(38):1–16. https://doi.org/10.1186/s10033-021-00554-7

9. Murr LE, Gaytan SM, Ramirez DA, Martinez E, Hernandez J, Amato KN, et al. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology.* 2012;28(1):1–14. https://doi.10.1016/S1005-0302(12)60016-4

10. Lawrense AR, Michaleris P. Effects of Thermal Transport in Computation of Welding Residual Stress and Distortion. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2011;16(3):215–220. https://doi.10.1179/1362171810Y.0000000027

11. Глушко С.П., Поправка Д.Л., Абрамов Н.С. Моделирование теплового процесса центробежной биметаллизации внутренней поверхности втулок. *Сварочное производство*. 2009;(6):30–35.

Glushko SP, Popravka DL, Abramov NS. Modeling the Thermal Process of Centrifugal Bimetallization of the Inner Surface of Bushings. *Welding Production.* 2009;(6):30–35. (In Russ.)

12. Судник В.А., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Цвелёв Р.В. Методика определения характеристик эквивалентного источника теплоты для выполнения расчетов деформаций при сварке. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015;(6–2):32–43. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2015_06_part_2.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

Sudnik VA, Erofeev VA, Maslennikov AV, Tsvelev RV. Methodology of Determining the Equivalent Heat Source Parameters for the Subsequent Calculations of the Structure Distortions. *Izvestiya Tula State University.* 2015;(6–2):32–43. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2015_06_part_2.pdf (accessed: 20.03.2025).

13. Полищук В.А. Математическое моделирование процессов сварки. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2014;20:356–360. URL: http://e-koncept.ru/2014/54332.htm (дата обращения: 20.03.2025).

Polishchuk V. Mathematical Modeling of Welding Processes. *Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept"*. 2014;20:356–360. URL: http://e-koncept.ru/2014/54332.htm (accessed: 20.03.2025).

14. Вершинин В.П., Дмитриев И.К. Экспериментальные исследования распределения температуры в тавровых соединениях при сварке. *Инженерный вестник Дона*. 2023;(4):1–9. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8330 (дата обращения: 20.03.2025).

Vershinin VP, Dmitriev IK. Experimental Research of Temperature Distribution in Tee Joints during Welding. *Engineering Journal of Don*. 2023;(4):1–9. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8330 (accessed: 20.03.2025).

15. Иванов С.Ю., Кархин В.А., Михайлов В.Г. Моделирование тепловых процессов при сварке соединений с криволинейными швами. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015;(6–2):62–66. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2015_06_part_2.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

Ivanov SYu, Karhin VA, Michaylov VG. Modelling Welding Processes with Curvilinear Seams. *Izvestiya Tula State University*. 2015;(6–2):62–66. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2015_06_part_2.pdf (accessed: 20.03.2025).

Об авторе:

Сергей Петрович Глушко, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Инженерии систем управления, материалов и технологий в машиностроении» Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, sputnik_s7@mail.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Sergey P. Glushko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering of Control Systems, Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350000, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, sputnik_s7@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 23.03.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 18.04.2025
Принята к публикации / Accepted 22.04.2025